

日立製作所における送変電機器および系統技術の開発

Recent Trends of Development in Substation and Transmission Equipments

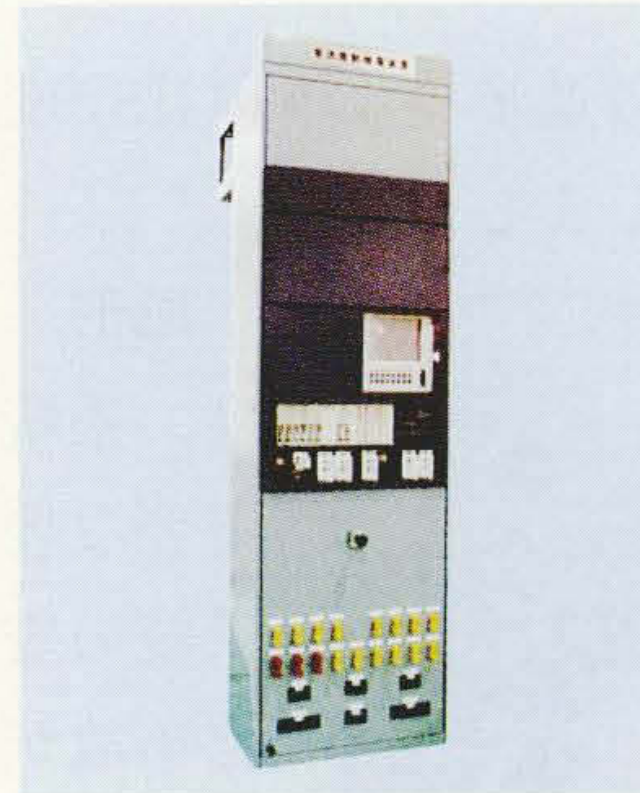
福田輝夫* Teruo Fukuda 小林昌三* Shôzô Kobayashi
村岡泰夫* Yasuo Muraoka 牧野淳一** Jun'ichi Makino



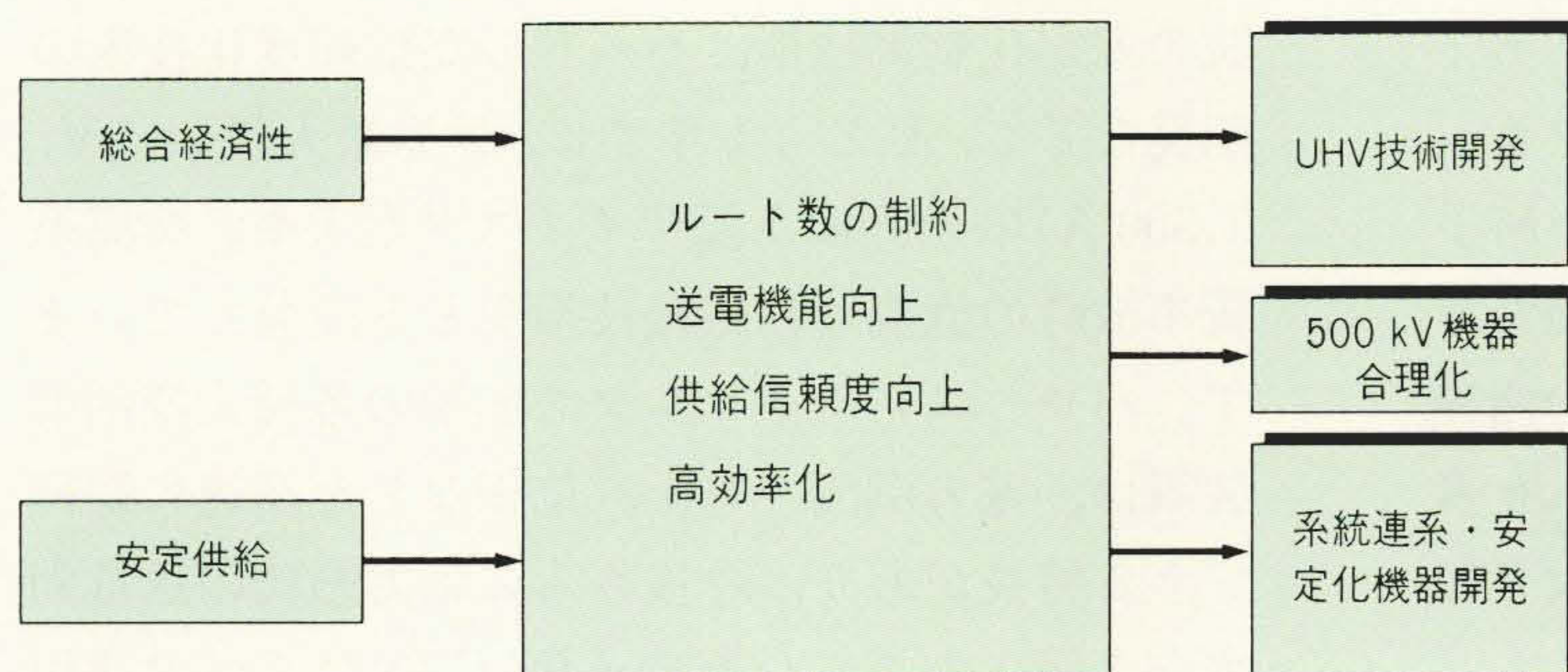
1,000 kV変圧器



1,000 kVガス絶縁開閉装置



1,000 kV用保護継電装置



交直流変換設備

基幹系電力系統のニーズと対応

電力需要の着実な増加に対応して、基幹系電力系統ではUHV系統や系統連系の導入が計画、推進されている。

わが国の電力需要は堅調に伸びており、これに伴って電力系統規模はますます拡大し、電源の遠隔化、集中化に向かう情勢にある。このため、電力流通設備の大規模・長距離化はいっそう進むものと予想される。わが国固有の立地条件や環境条件を考慮し、総合的な経済性を追求しながら、高い供給信頼度を維持するため、さまざまな技術開発が行われ、電力流通設備が形成されてきている。現在、わが国の基幹系統を形成している500 kVを主とする変電機器について、日立製作所は総合的な経済性に寄与するコンパクト、かつ環境調和に優れた高信頼性の機器、およびシステムを基本として開発・実用化を進めてきた。

1,000 kV送電は長距離・大容量送電の切り札とし

て東京電力株式会社が開発を推進しており、21世紀初頭にわが国初の1,000 kV送電開始を計画している。日立製作所は、1979年から1984年にかけて第一期開発を行ったが、今回はその後の技術開発成果を広範囲に取り入れ、実器にそのまま適用可能な技術開発を行い、工場での実規模試作を経て東京電力株式会社新榛名変電所構内UHV機器試験場の実証器を納入した。

また、近年電力会社間での連系強化の有効な手段として、直流連系システムの適用が活発化している。そのため、大容量の連系および送電に適した高信頼度で高機能な高電圧・大容量交直変換システムの開発・実用化を推進している。

* 日立製作所 電力事業部 ** 日立製作所 電力事業部 工学博士

1 はじめに

わが国の電力系統では、社会経済の発展による電力需要の増加に伴い、順次送電電圧の格上げおよび系統の拡充、整備が行われてきた。特に、1965年に次期送電電圧を500 kVにすることが決定され、その後500 kV系統が次々と完成し、電力系統の基幹としての地歩を固めてきた。

一方、1965年に電源開発株式会社佐久間周波数変換所が、1977年に東京電力株式会社新信濃周波数変換所が、また、1979～1980年に電源開発株式会社北海道・本州間直流連系設備がそれぞれ完成し、全国規模の電力広域運用の道が開かれた。

近年、経済情勢の変化などを受けて電力需要も多様化し、内需を中心とした安定成長、高度情報化社会への構造変化などを反映して、着実に増加していくものと予想されている。

この電力需要の増加に対応して、電源の拡充や広域運用の拡大などが進められている。系統規模の拡大とともに系統短絡容量の増大、および系統安定度が問題となる。短絡容量の増大に対しては、遮断電流63 kAの遮断器の導入が進められている。短絡容量対策、安定度向上対策に関する抜本的対策として上位電圧(UHV 1,000 kV)の導入が21世紀初頭に計画されており、日立製作所は変圧器、ガス絶縁開閉装置、保護・制御装置など設備を形成

するために必要な機器装置の開発を進めてきた。

また、安定度向上および電力会社間の非同期連系を可能とし、広域運用に寄与する直流連系システムについても光直接点弧方式などによる合理化を実現し、東京電力株式会社および電源開発株式会社に周波数変換設備、直流連系設備を納入した。

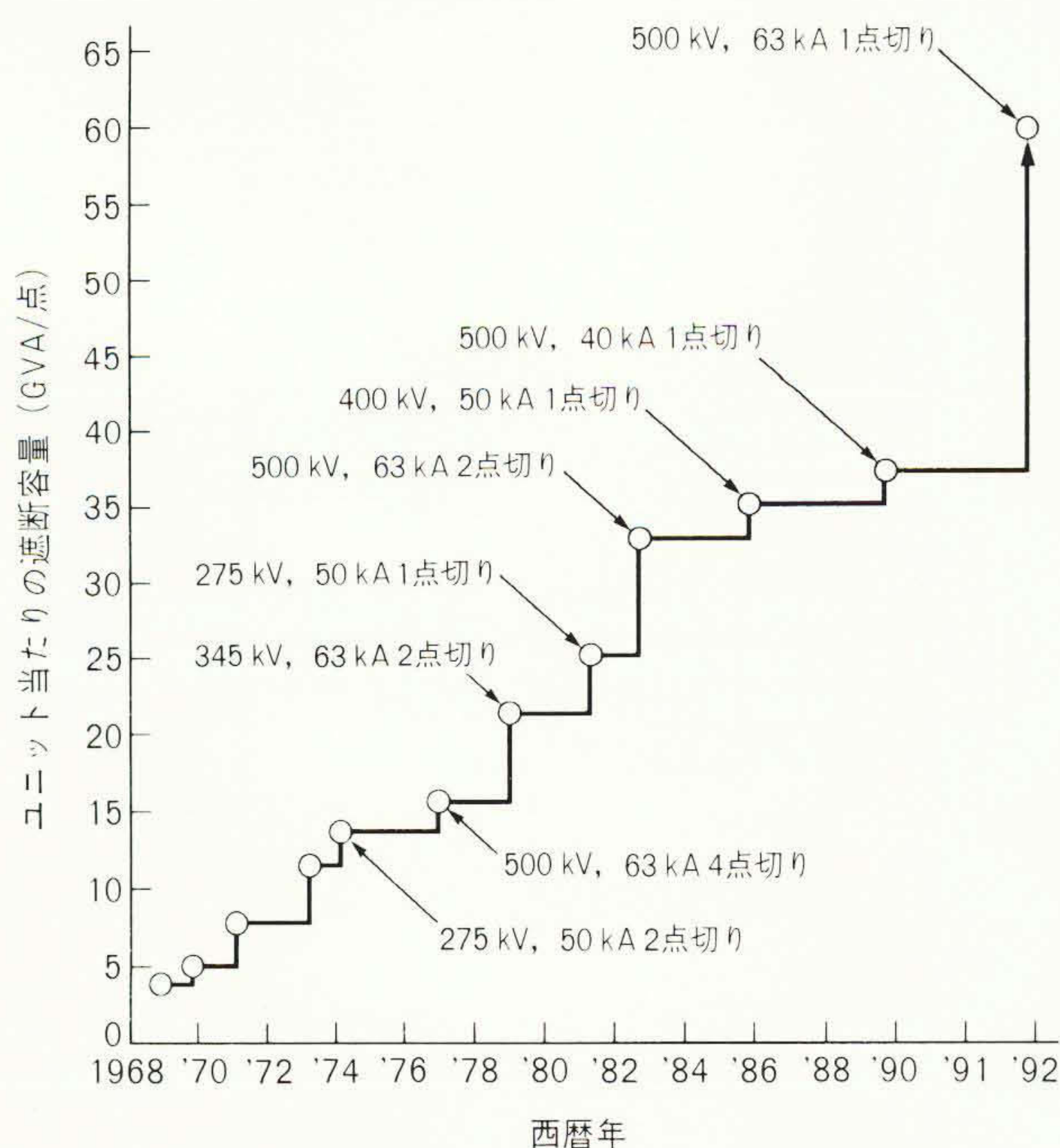
系統安定化システムとしてのSVC(静止形無効電力補償装置)は、1986年に電源開発株式会社函館変換所用32 MVA TCT(サイリスタ制御変圧器)方式のSVCを開発して実証試験に供したのをはじめ、東京電力株式会社、中部電力株式会社および東北電力株式会社向けに計350 MVAを納入した。

ここでは、超々高圧変電機器の合理化・高機能化、1,000 kV送変電機器・装置の開発と最近納入した直流連系、および系統安定化用SVCシステムの技術的な特徴を含む概要について述べる。

2 基幹系超々高圧変電機器の合理化・高機能化

2.1 変圧器

UHV第一期開発でのハイブリッド絶縁技術〔成形絶縁物充てん技術+油隙(げき)細分割技術〕を適用しコンパクト化を実現した。さらに、巻線内部の電界集中を緩和できる低誘電率材料を活用した誘電率整合絶縁技術を開発し、信頼性向上といっそうのコンパクト化を達成して500 kV変圧器に適用している。



(a) ガス遮断器遮断性能の向上の経緯



(b) 外 観

図1 500 kV ガス遮断器の合理化

ガス遮断器の開発当初から現在に至るまでの遮断性能の推移、および最新型500 kVガス遮断器を示す。

2.2 500 kV ガス遮断器，ガス絶縁開閉装置

系統規模の増大に伴い，短絡電流は従来の50 kAから63 kAに増大し，さらにコンパクト化の要求から1,000 kV 2点切ガス遮断器技術を適用して500 kV, 63 kA一点切りのガス遮断器を開発，実用化した。ノズル内の気流解析をもとに，遮断部の設計改良や材料の開発を行って実現した。同時に，組み立てしやすく信頼性の高い設計構造を実現した。ガス遮断器の遮断性能の向上の経緯を図1(a)に，500 kV, 63 kA一点切りガス遮断器の外観を同図(b)に示す。500 kV一点切りガス遮断器や1,000 kV技術などを適用することにより，ガス絶縁開閉装置のいっそうのコンパクト化が期待できるため，今後開発を推進していく考えである。

3 1,000 kV送変電機器・装置の開発状況

1,000 kV送電は，電力需要の増加による系統の拡大や電源の集中化に伴う短絡・地絡電流の増加，および電源の遠隔地化に伴う系統安定度の低下等を解決するなど，次世代の基幹送電系統として期待されている。

この1,000 kV送電系統を構成する1,000 kV送変電機器については，500 kV昇圧時の技術背景とは異なり，わが国独自の技術によって開発を進める必要性や，わが国固有の立地条件，系統条件などを考慮しながら実用化を

図っていくことが必要であり，実器相当設備による実証試験が東京電力株式会社で計画され，1995年からの長期課通電試験などに向け準備が進められている¹⁾。日立製作所は，この実証試験計画に計画当初から参加し，変圧器，ガス絶縁開閉装置，保護・制御装置など機器装置の開発実用化を推進し，実証試験場への実証試験器の設置を完了した。設計，製作，据付けの各段階で得られた貴重な経験，および1995年からの実証試験の成果を実器に反映するための検討を継続していく考えである。また，これらの開発技術は広く適用可能な基盤技術であり，500 kV以下の機器装置の合理化，経済性向上，信頼性向上に寄与するものとして期待できる。

1,000 kV送変電機器の開発については，第一期開発(1979年～1984年)での要素技術開発，プロト器開発成果も反映しながら，最新の仕様や技術などに基づいて，要素技術開発・実規模試作検証～零号器試作検証～製品設計製作を順次行った(図2参照)。なお，社内に特別研究体制を組織し，技術開発を総合的かつ効率的に推進するように配慮した。このようにして開発した機器装置の技術課題，特徴(表1参照)などについて以下に述べる。

3.1 変圧器

1,000 kV変圧器の開発にあたって，配慮すべき第一条件はわが国の輸送条件であり，現状の500 kV器と同等の

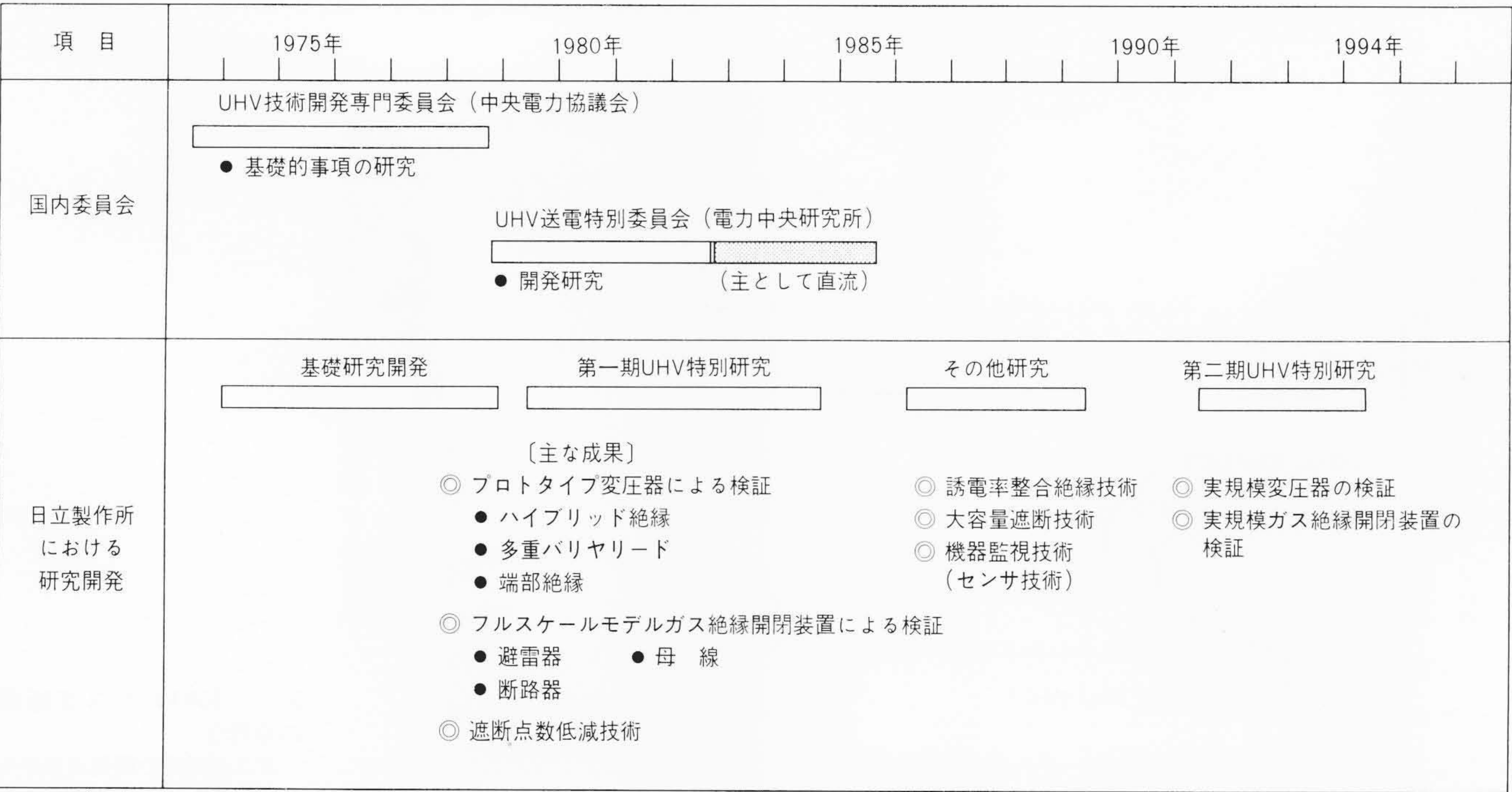


図2 1,000 kV送変電機器の研究開発の経緯
基礎研究から，実規模器検証に至るまでの20年間の経緯を示す。

表1 1,000 kV送変電機器・装置の開発課題と技術的特徴
1,000 kV技術開発での課題と特徴を示す。

機器・装置	開 発 題 課	技 術 的 特 徴
変 圧 器	● 高信頼度化 ● コンパクト化 ● タンク分割化 (輸送制限に対応)	● 誘電率整合絶縁による電圧ストレス緩和 ● グラディエント キャパシタンス インターリーブ巻線による電位振動抑制 ● 高電界化新絶縁技術 ● タンク間接続多重バリヤードによる組立作業性、信頼性向上 ● 高精度解析技術(移行電圧、巻線共振ほか)
ガス絶縁開閉装置	● 高信頼度化 ● コンパクト化 ● 低サージ ● 高速再閉路確保	● 形状最適化による絶縁スペーサの高電圧ストレス化・母線径縮小 ● 抵抗投入・遮断による遮断器開閉サージ抑制(2→1.6~1.7 p.u.) ● 抵抗挿入による断路器サージ抑制(3→1.3 p.u.) ● 焼成技術、スクリーニング技術による酸化亜鉛形避雷器素子のエネルギー耐量向上 ● 無効パuffaによる高速接地装置の有効吹付時間確保
保護・制御装置	● 高分解能、高精度化 ● コンパクト化 ● ヒューマンフレンドリーな インタフェース ● 光変成器の実用化	● 主保護・後備保護の一体構成(送電線保護) ● タッチパネル式フラットディスプレイの実用化 ● 4,800 Hzサンプリングと高速処理技術 ● 14ビットアナログ・デジタル変換と演算性能高度化 ● 小型・軽量化、経済性の向上

輸送制限に対応するために、1相2分割して現地で並列接続する単相単巻変圧器とした。なお、この分割タンク間の接続を、信頼性よく効率的に実施するための構造(多重バリヤード)、および工法(スライドドッキング方式)の開発も合わせて行っている。

絶縁には、ハイブリッド絶縁技術、誘電率整合絶縁技術を適用し、信頼性向上と小型化を達成した。

巻線には、巻線内の電位分布の均一化を図れるグラディエント キャパシタンス インターリーブ巻線を適用し、雷インパルス電圧などに対する信頼性を向上している。

3.2 ガス絶縁開閉装置

ガス絶縁開閉装置は、遮断器、断路器、避雷器などで構成した複合装置である。1,000 kV送変電設備の合理的な形成を図るためには、遮断器や断路器の開閉によって発生するサージ電圧や、変電所に侵入する雷サージ電圧を、その定格電圧に対する倍率が従来の500 kVよりも十分低く抑制することが必要である。遮断器では抵抗投入・遮断方式を採用し、抵抗体の熱耐量、耐電圧性能や主遮断部、抵抗遮断部の動作信頼性について十分な検証を行っている。また、断路器では遮断器と同じく開閉時に抵抗を挿入する方式を採用し、抵抗体への確実な転流の確認などの検証を行っている。

絶縁設計の合理化の鍵(かぎ)となる避雷器については、過電圧抑制特性の向上に伴い熱エネルギー責務が過酷となることから、酸化亜鉛素子のエネルギー耐量の向上を図ったほか、急峻(しゅん)波に対する応答特性の検

証などを行っている。

送電線の高速再閉路を行うために高速接地装置が採用されるが、長アーク時間対応やそのときのアーク挙動等についての検証などを行っている。

3.3 保護・制御装置

電力系統の供給信頼性の確保を担う保護制御装置は、ハード、ソフト両面から高性能・高機能化が図られてきた。特にハード面は現在まで適用してきたマイクロプロセッサの技術進歩が著しく、高速・高精度処理が容易となってきた。そのため、最新のデジタルデバイス技術を適用し、運用保守面も高度化した「第二世代デジタルリレー」が開発された。その適用初号器は東京電力株式会社新榛名変電所のUHV実証試験用デジタル保護・制御装置として納入している。

今回のUHV実証試験用デジタル保護・制御装置は、送電線、母線、変圧器用保護などで構成している。

開発した重点項目は次のとおりである。

- (1) アナログ入力部の高度化(4.8 kHz高速サンプリングと14ビット高精度A-D変換)
- (2) ヒューマンフレンドリーなインタフェースの革新(屋外用は可搬形ツール方式,屋内用はタッチパネル式のフラットディスプレイ採用)
- (3) 演算性能の高度化
- (4) 通信インタフェースの拡充

システム構成の考え方としては、マルチプロセッサ方式を採用し、高度化する保護機能とヒューマンインタフ

表2 最近建設された直流連系プロジェクト
最新技術を適用した機器, 制御装置を用いてシステムを構成している。

項 目		新信濃FC-II	佐久間FC	北本HVDC-III
一般事項	運 転 開 始	1992年 5 月	1993年 6 月	1993年 3 月
	建 設 主 体	東京電力株式会社	電源開発株式会社	電源開発株式会社
設備概要	設 置 目 的	50/60 Hz 異周波系統間連系 (既設と並列増設)	50/60 Hz 異周波系統間連系 (既設水銀バルブ更新)	海底ケーブル (44.4 km) を持つ直流連系 (既設単極から双極・増設)
	定 格 容 量	300 MW (I, II 期合計 600 MW)	300 MW	300 MW (I, II 期合計 600 MW)
	定格直流電圧 定格直流電流	125 kV 2,400 A	125 kV 2,400 A	±250 kV 1,200 A
	変 換 器 方 式	屋内用空気絶縁水冷式 4 段積みサイリスタバルブ	同 左	同 左
	適用サイリスタ	6 kV, 2,500 A 光直接点弧方式 28個直列×12アーム	同 左	6 kV, 1,500 A 光直接点弧方式 56個直列×12アーム
特記事項	特 記 事 項	● 光DCPTの採用 ● HVDC/FC用として初の全デジタル多重化システム	● サイリスタバルブ小型・軽量化 (当社比46%減)	● 親変換所 (「函館」側) から遠隔制御完全自動化制御

注：略語説明 DCPT(直流用計器用変圧器)
HVDC/FC(直流送電・周波数変換設備)

エース機能の適正な機能分担を図った。ハードとしては、主保護・後備保護の一体構造も可能とした。

4 最近の系統連系関連技術の開発状況

直流連系および系統安定化装置(ここでは主にパワーエレクトロニクス応用システムを言う。)の基礎は、昭和40～50年で実用化された第一世代の東京電力株式会社新信濃変電所300 MW周波数変換設備と、電源開発株式会社北海道・本州間直流連系(300 MW, 250 kV単極)に集約され実用化の花が開いた。その後しばらく実プラント建設は途切れるが、技術開発は、電力会社との共同研究

や1978年11月に発足した「UHV送電特別委員会」に合わせて基幹送電への直流技術の適用を考慮した「高電圧・大容量交直変換装置」, および原子力電源送電を想定した「高信頼度直流送電システム技術」の一連の開発が推進された³⁾。

今回取りまとめた第二世代の直流連系プロジェクトやSVCでは、昭和50年代後半に世界に先駆けて開発した各種新技術を、中小容量での直流変換システムに適用したことが特徴である。最近建設された三つの直流連系プロジェクトを表2に示す。

系統連系関連技術として、直流連系プロジェクトの建設設計を通じて得られた、主として「高信頼度変換器技術」と適用技術を含めた「系統解析技術」の詳細についてはこの特集の別論文で述べる。

次のステップとして「基幹系大容量・高電圧直流送電プロジェクト」の計画が控えている。これに対する実用化技術開発についても今回の特集で述べた技術をベースとしており、適用プロジェクトの合理的システム形成に向けて、変換器技術ではいっそうの大容量パワーデバイスの開発が、あるいは系統運用に伴う各種の機能を持つ制御技術が付加されて集大成されていくものと考える。「基幹系直流送電用変換システム技術の開発」については次の機会に譲りたい。

5 おわりに

送変電機器の技術開発の歴史でエポックとなる基幹系超々高圧変電機器および1,000 kV変電機器, ならびに保護・制御技術と直流での高信頼度直流送電用として開発した交直変換機器, システム技術について述べた。

今後、1,000 kV開発技術はその実用化に向けて集大成していくのはもちろんのこと、それと同時に、得られた高度な技術を500 kV以下の変電機器やシステム技術にも大いに適用拡大して、合理化設計や経済性向上へ結び付けていく。

また、系統連系関連技術に関しては基幹系への適用を考えた「高電圧・大容量変換機器技術」, 「大容量電源送電用変換器運転制御技術」の実用化開発に向けて鋭意力を入れていく考えである。

参考文献

1) 田邊：100万V昇圧に向けた技術開発・建設について，電気学会電力・エネルギー部門大会，575(平成5)

2) 久和，外：最近の電力流通技術とその将来展望，日立評論，73，6，541～546(平3-6)

3) 村岡，外：直流送電技術と機器の高信頼度化，日立評論，65，5，351～356(昭58-5)